

AUVERGNE

Sciences

Numéro spécial - JUIN 2001



Contenrs



A l'occasion de son quinzième anniversaire l'ADASTA publie un numéro spécial consacré à la **couleur**. Ce document s'inscrit dans la lignée des publications, logiciels et matériels divers à but pédagogique qui ont été créés et diffusés par l'Association depuis sa création en juin 1986.

Le monde qui nous entoure apparaît coloré. Ainsi les objets se distinguent les uns des autres, non seulement par leur forme et leur texture mais également par leur couleur : il s'agit là d'un luxe biologique dont les humains sont les bénéficiaires privilégiés.

Et cependant la couleur n'a pas d'existence physique caractéristique des objets. La perception des couleurs est un phénomène

subjectif qui prend naissance dans une région du cortex cérébral où les facteurs physiologiques et psychologiques jouent un rôle essentiel. Le système visuel est capable de déceler, dans une lumière, la fréquence dominante des radiations et de convertir cette donnée sous forme de couleur.

Ce numéro spécial d'une cinquantaine de pages entièrement imprimé en quadrichromie s'adresse à tous les lecteurs désireux d'enrichir leur documentation et en particulier aux enseignants des diverses disciplines ; l'auteur s'intéressera plus particulièrement aux causes physiques de la couleur. Après l'introduction où sera retracée brièvement l'évolution historique du concept «**couleur**» on trouvera un développement scientifique sur les couleurs interférentielles, puis une étude historique et physique des verres colorés dont notre pays possède un patrimoine exceptionnel sous forme de vitraux. Les phénomènes de diffusion sont responsables de la couleur du ciel et de nombreuses particularités rencontrées dans la nature : les lecteurs sont invités à se livrer à quelques observations et expériences à ce sujet.

L'ADASTA est aujourd'hui fière de publier ce travail sur la **couleur**. Son auteur, Roland Jouanisson fut directeur scientifique de nombreuses années à l'ADASTA ; actuellement il est membre actif du conseil d'administration et du bureau. Agrégé de sciences physiques, ancien Maître de conférences à l'université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, il est l'auteur d'articles et d'ouvrages dans le domaine de l'optique notamment. Il a présenté une remarquable conférence le 24 janvier 2001 dans les locaux de l'ADASTA sur «*La lumière polarisée*».

Enfin les immenses possibilités de l'informatique permettent de traiter du sixième article : «*couleur numérique et exploration mathématique à l'interface Art science*» dont l'auteur présente certains aspects d'une recherche artistique menée sur ordinateur et centrée sur la couleur : un ensemble de remarques sur l'enrichissement qu'apporte cette recherche dans la création plastique en particulier dans la peinture algorithmique ; les documents remarquables de l'auteur Bernard Caillaud, Docteur en science de l'art et plasticien spécialisé en peinture numérique, enseignant de sciences physiques au lycée Malherbe de Caen.

Il est à noter que les photographies ont été réalisées par les auteurs.

Nous remercions vivement deux membres actifs de l'ADASTA qui ont participé à cette publication : Luc Dettwiller qui a suggéré d'utiles remarques et Bernard Ragout webmaster dans la revue qui a réalisé certains schémas originaux.

Enfin nos sponsors, sans qui nous n'aurions pu entreprendre cette revue spéciale, sont ici particulièrement remerciés.

Bonne lecture à tous,

Le Président

Jean-Claude Capelani

Merci à nos sponsors

Sommaire

La couleur avant Newton	3 à 7
Couleurs interférentielles	9 à 18
Les verres colorés et leur histoire	19 à 25
Origine et apparences des couleurs	26 à 30
Couleurs de la nature	31 à 36
Couleur numérique et exploration mathématique	37 à 46

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel.....	150 F - 22,87 €
Adhésions à titre collectif.....	500 F - 76,22 €
Membre bienfaiteur.....	1 000 F - 152,45 €

L'adhésion donne droit au service gratuit du bulletin et à des réductions sur les différents services rendus par l'Association (publications, stages, visites,...)

Permanences : L.A.D.A.S.T.A. a de nouveaux horaires d'ouverture : Lundi 14 H 00 à 18 H 00 ; Mardi 8 H 00 à 12 H 00, 14 H 00 à 17 H 00 ; Mercredi 8 H 00 à 12 H 00, 14 H 00 à 18 H 00 ; Jeudi 8 H 00 à 12 H 00, 14 H 00 à 17 H 00 ; Vendredi 8 H 00 à 12 H 00

Adressez le courrier à : **ADASTA, 19, rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand - Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04**
E-mail : adasta@wanadoo.fr - Site Internet : http://perso.wanadoo.fr/adasta

Directeur de publication : Jean-Claude Capelani

La couleur avant Newton

par Roland Jouanisson

La couleur est un phénomène particulièrement complexe faisant intervenir un grand nombre de disciplines qui ne sont pas toutes de nature scientifique. A la physique, à la chimie, à la physiologie, à la psychologie et à quelques autres sciences humaines, il faut ajouter un aspect culturel et social, parfois difficile à formuler et qui a varié selon les époques et les civilisations.

Il ne faut donc pas s'étonner que le sujet de la couleur soit traité à partir de points de vue très différents, conduisant parfois à des conclusions hasardeuses qui ne sauraient être adoptées d'emblée par un esprit scientifique, tenu à une certaine prudence. Prudence ne veut pas dire que les scientifiques s'interdisent d'intervenir dans certains domaines qui seraient par nature "réservés". Prenons, par exemple, le cas des relations entre science et art qui font souvent l'objet de malentendus. Il ne fait pas de doute, aujourd'hui, qu'un certain nombre de "théories", élaborées par des artistes pour justifier leurs œuvres, sont des inepties scientifiques.

On ne peut que sourire de nos jours des attaques véhémentes telles que les diatribes de Goethe envers l'œuvre scientifique de Newton ; on n'attacherait qu'une importance anecdotique aux attaques dont il fut l'objet au début du XIX^{ème} siècle de la part des poètes anglais Keats et Lamb, qui lui reprochaient d'avoir "dépoétisé" l'arc-en-ciel, si cette attitude n'était pas aussi répandue dans le public. Il est

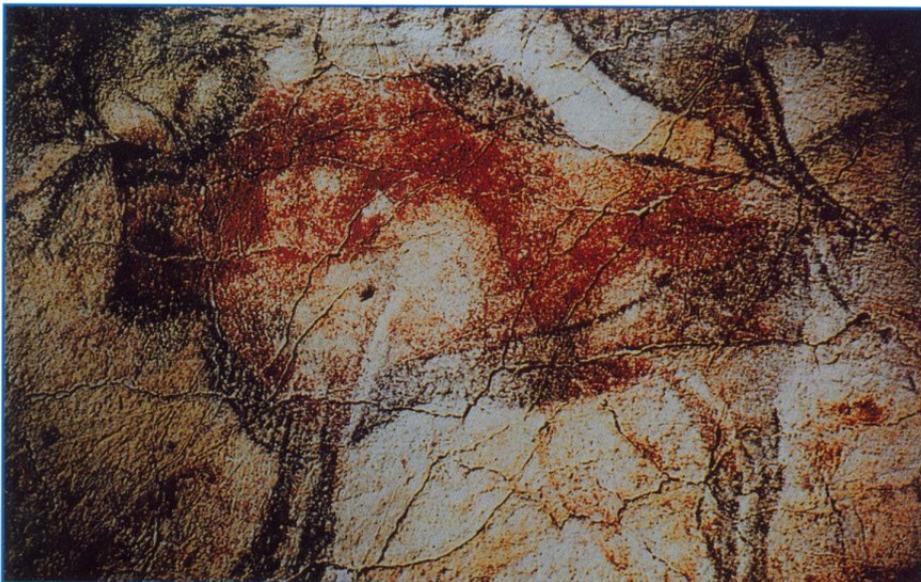
pourtant évident que la connaissance apporte, au contraire, des sujets d'émerveillement que les dits poètes ne pouvaient pas, et pour cause, imaginer.

D'autre part la connaissance scientifique n'interdit pas de porter un jugement sur la pertinence des conceptions artistiques pour la bonne raison qu'elles reposent, le plus souvent, qu'on le veuille ou non, sur des supports scientifiques...

Notre objectif, dans cet article, est d'ébaucher une histoire de la couleur à ses débuts, de signaler quelques unes des voies utilisées par les historiens, les ethnologues, les philologues, psychologues, etc... qui tentent de comprendre comment l'Homme s'est approprié la couleur. Parallèlement nous rappellerons les principales étapes de la connaissance scientifique dans le domaine de la lumière.

► La préhistoire

On sait que dès l'époque paléolithique l'Homme a utilisé des matières colorantes à des fins diverses. Ainsi dans le mobilier funéraire, on trouve des galets peints, le plus souvent avec des oxydes ferriques rouges (hématite). Certains de ces colorants avaient même fait l'objet d'un traitement thermique (hématite obtenue à partir de goethite). Souvent, dans les peintures rupestres, on trouve des produits minéraux naturels qui permettent d'obtenir des nuances variées.



Les premières représentations picturales connues utilisaient des colorants à base d'oxydes ferriques. (Grotte d'Altamira, époque magdalénienne)

Le rouge est vraisemblablement la plus ancienne couleur perçue et utilisée par l'Homme, sans pour autant être conceptualisée en tant que telle. On émet beaucoup d'hypothèses sur la prééminence de cette couleur. N'est-elle pas la couleur du sang, des sources lumineuses, du feu, du soleil couchant, etc... c'est-à-dire des sources vitales ? On a imaginé aussi que nos lointains ancêtres n'avaient pas tout à fait le même système visuel que nous, de sorte qu'ils auraient été beaucoup moins sensibles aux courtes longueurs d'onde, comme le bleu. Une évolution lente se produirait encore sous l'influence de facteurs culturels. Pour certains, ces modifications ne seraient pas sans rapport avec la couleur de la peau car il existe des différences de perception notables, semble-t-il, entre blancs et noirs.

► L'Antiquité

A l'époque pharaonique on découvre un univers plus coloré où au rouge et à l'ocre s'ajoutent les bleus et les verts, grâce à l'utilisation des pierres précieuses notamment. Le lapis lazuli, d'un bleu intense, a été utilisé comme pigment et a permis d'obtenir, selon le traitement subi, différentes nuances de bleu. Le vert égyptien est obtenu selon des techniques analogues. C'est un mélange de silicates avec des traces de cuivre ayant subi une cuisson à une température voisine de la fusion. L'influence égyptienne rayonnera sur tout le Moyen Orient et la Grèce. En revanche, on ne dispose que d'un nombre limité de textes pouvant être interprétés en vue de la connaissance des couleurs.

La Grèce fournit une littérature abondante. Disons d'emblée que les textes concernant la couleur y sont rares, sauf en ce qui concerne le rouge (pourpre, écarlate, vermillon) et, bien sûr, le blanc et le noir. Là encore la prééminence du rouge est évidente. Dans "les travaux et les jours" d'Hésiode, il est question de tissages "aux couleurs innombrables", mais aucune n'est citée. Dans l'œuvre d'Hérodote, la seule description colorée concerne les murailles de la ville mède d'Ecbatane⁽¹⁾ qui comprenait sept enceintes dont les créneaux étaient blancs, noirs, pourpres, bleus, orangés, argentés et dorés. Pourtant l'historien grec, qui a beaucoup voya-



A l'époque pharaonique apparaissent les bleus à base de lapis lazuli.
(Dashour, Pectoral de Sesostris II, XII^e dynastie)

gé, et ne se lasse pas de donner des précisions sur les lieux qu'il visite, par exemple sur la faune et la flore en Egypte, ne cite jamais, à cette occasion, d'autre couleur que le rouge (ou le pourpre).

C'est apparemment chez les philosophes présocratiques qu'apparaît le concept de couleur. Dès la fin du VI^{ème} siècle avant notre ère Xénophane décrit l'arc-en ciel où il voit trois couleurs (rouge, jaune-vert et violet). Les Pythagoriciens (vers -560) considèrent qu'il existe quatre couleurs (blanc, noir, rouge et ocre). Pour Empédocle (au V^{ème} siècle), "il y a quatre couleurs, égales en nombre aux éléments : le blanc, le noir, le rouge, et l'ocre"⁽²⁾. Empédocle aurait été le premier à émettre l'idée que nous avons connaissance des objets grâce à la lumière qu'ils nous envoient. De nombreux auteurs ont continué de penser, et jusqu'au moyen âge, que c'est la lumière émise par les yeux qui va scruter les objets.

Aristote donne une description précise de l'arc-en-ciel et remarque que les peintres sont dans l'incapacité de produire certaines couleurs par des mélanges comme l'écarlate, le vert et le pourpre, ce qui sous tend la notion de couleurs fondamentales. Pour Démocrite le blanc, le noir et le rouge sont des couleurs fondamentales dues aux atomes. Platon justifie l'existence des couleurs à partir du feu, de l'humidité, du blanc et du noir. Lucrèce qui reprend des idées à Démocrite et Epicure, s'interroge sur la couleur des objets. Il note que la couleur change avec l'éclairage sur le plumage de la colombe et le rubis. Il remarque aussi que plus on divise un corps en menus morceaux, plus les couleurs pâlisent : ainsi "la couleur pourpre, de beaucoup la plus éclatante de toutes, si l'on effiloche l'étoffe, disparaît complètement"⁽³⁾ mais il en conclut hâtivement que "les parcelles de matière se dépouillent de leurs couleurs avant

d'être réduites à "l'état d'atomes."

Ptolémée s'intéresse aux mélanges de couleurs : il réalise une synthèse comparable à celle que réalisera Newton en faisant tourner un disque de plusieurs couleurs.



L'héraldique médiévale utilise 5 couleurs, en plus de l'or et l'argent. (Encyclopédie Larousse)

Pendant plus d'un millénaire le monde occidental ne verra pratiquement aucun progrès ; les idées des anciens, notamment celles d'Aristote, ne seront pas mises en doute. Dans le monde arabe cependant on note des avancées non négligeables, grâce à Ibn-Al-Haitham (965-1039), plus connu sous le nom d'Alhazen en Occident. Alhazen s'est particulièrement intéressé à la propagation de la lumière : il justifie ou infirme certaines idées des anciens par des observations pertinentes. Il réfute l'idée que la lumière soit émise par l'œil sous forme d'un "quid" interrogateur. En effet l'œil est ébloui et peut être endommagé quand il regarde le soleil : comment pourrait-on expliquer cet éblouissement si c'est l'œil qui envoie de la lumière ? Autre

exemple : Si l'on voit disparaître les étoiles à l'aube c'est que la lumière solaire est très supérieure à la lumière des étoiles... L'œuvre d'Alhazen marque une transition entre l'Antiquité et l'époque moderne en ce sens que l'on voit apparaître le souci d'une méthode expérimentale qui sera développée chez R. Bacon, Képler, Descartes et Galilée, entre autres.

Pendant les longs siècles qui précèdent le Moyen Age et la Renaissance, la couleur rouge et les couleurs voisines (écarlate, vermillon, pourpre...) occupent le premier plan. Pour comprendre l'importance de ces couleurs il faut remarquer, en plus les observations formulées plus haut, que seul le rouge pouvait être fixé efficacement sur les tissus. D'ailleurs teindre un tissu était synonyme de le teindre en rouge. Le pourpre extrait d'un coquillage (murex) avait des qualités colorantes bien supérieures aux végétaux et jouissait d'une renommée exceptionnelle. Son nom grec (Phoinos) serait à l'origine du nom

des Phéniciens, inventeurs de cette teinture. Il est également à l'origine du nom du Phénix, cet oiseau sacré, au plumage rouge et or, qui renaissait de ses cendres. Quand au vermillon (du latin *vermiculus*, signifiant vermisseau) il était produit à partir de la cochenille du chêne Kermès.

De nombreux textes nous confirment cet aspect prééminent des couleurs rouges. On sait par exemple que les hoplites de Sparte portaient des tuniques rouges de pourpre (afin, disait-on que le sang n'y parût pas !) Dans l'armée athénienne le vêtement des officiers était orné de bandes de pourpre. Si l'on en croit Hérodote, "aux temps anciens tous les navires étaient peints en vermillon"⁽⁴⁾. Déjà Homère avait évoqué des nefes aux



L'arc-en-ciel est présent dans la symbolique de nombreuses civilisations. Son explication scientifique est due essentiellement à Descartes.

"joues vermillonnées" sur une mer "lie de vin"⁽⁵⁾. La philologie confirme ces observations. Dans beaucoup de langues africaines la seule couleur perçue (en dehors du noir et du blanc) est le rouge. Il existe même des langues qui n'ont pas de mot propre pour désigner la couleur : on fait appel à d'autres notions pour qualifier ce que nous désignons par le mot couleur.

Dans la civilisation occidentale, on n'a distingué que tardivement le bleu indigo (qui est un bleu vert) ; le même terme a longtemps désigné le jaune et le vert ; Seule la racine indo-européenne REUDH, dont sont issues dans de nombreuses langues les termes évoquant le rouge, possède un grand nombre de dérivés. Tout se passe comme si le rouge était "la" couleur, les autres nuances étant considérées comme des sensations plus ou moins lumineuses. Certaines langues gardent le souvenir de cet état de fait : En russe le même mot signifie rouge et beau, en espagnol le mot "colorado" a également gardé le sens de rouge.

Mais bientôt le Moyen Age va s'affranchir de cet univers restreint avec le développement de produits tinctoriaux, de pigments colorés... et d'autres phénomènes qu'il serait intéressant de rechercher. Par exemple l'écllosion massive et rapide des verres colorés, sous forme de vitraux notamment, commence vers le XII^{ème} siècle et connaîtra un essor extraordinaire pendant tout le Moyen Age et la Renaissance. L'Eglise reconnaîtra cinq couleurs liturgiques, fixées par le pape Innocent III (entre 1198 et 1216), qui sont le blanc, le violet, le vert, le rouge et le noir. L'art du blason admettra également cinq couleurs et les livrées royales de Charles VI à Louis XIII en comporteront douze, dont quatre sont des variétés de rouge : l'incarnat, le vermeil, le rouge et le cramoisi. Désormais la couleur

est entrée dans la vie quotidienne et s'est diversifiée au point qu'au XIX^{ème} siècle le dictionnaire de Littré répertorie 40 variétés de vert !

Cependant au Moyen Age si on est capable de créer des nuances nombreuses par des moyens empiriques, on ne connaît pas l'origine scientifique de la couleur. Il faudra attendre les expériences magistrales de Newton au XVII^{ème} siècle pour que le voile commence à se lever.

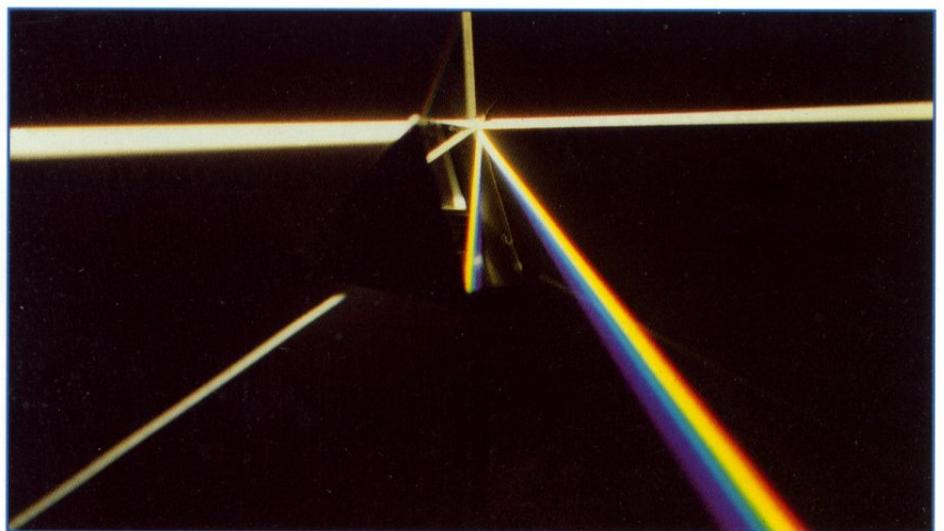
■ Naissance de la science moderne

Le Moyen Age n'apporte que peu de progrès scientifiques dans le domaine qui nous intéresse. On sait que les centres du savoir sont alors placés sous la haute autorité de l'Eglise. Dans les monastères sont enseignés les arts libéraux, héritage de la pensée grecque, des textes sacrés et des écrits de Saint Augustin. Les sciences de la nature sont considérées comme

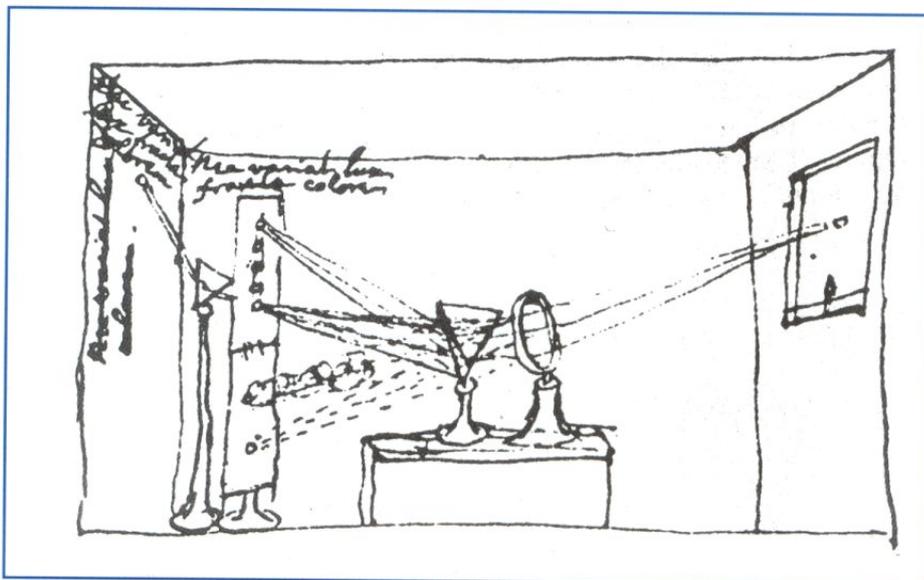
secondaires. Tout au plus sont-elles associées à une vision symbolique du monde, centré sur le christianisme, fortement enraciné dans la société de l'époque et que l'on peut découvrir de nos jours dans ces admirables témoignages que sont les cathédrales gothiques.

Cependant il existe quelques foyers qui n'hésitent plus à critiquer la pensée d'Aristote, à Oxford, par exemple, sous l'impulsion de Robert Grosseteste (1158 - 1253) qui considère que la lumière est le problème central de toute connaissance. Pour cela il préconise le contrôle des hypothèses émises par l'expérience et s'attache à rechercher les causes des phénomènes naturels. Parmi ceux-ci, l'arc-en-ciel.

L'arc-en-ciel a certainement fasciné les Hommes depuis toujours puisqu'il tient une place importante dans la symbolique de différentes civilisations, mais son explication scientifique sera longue à établir. On pense alors que l'apparition des couleurs est liée au phénomène de réfraction, comme pour le prisme. Connaître l'explication de l'arc-en-ciel est un enjeu d'importance car ce phénomène naturel, devenu symbole de l'Alliance, fait l'objet de querelles entre théologiens. De nombreux chercheurs s'attaquent au problème, notamment Bacon, qui remarque que les différentes couleurs observées font des angles bien déterminés avec la direction Soleil-œil de l'observateur. Il apparaît dès lors que c'est bien le phénomène de réfraction qui est responsable de la dispersion des couleurs. Finalement, c'est au moine Thierry de Freiberg (mort en 1311), que revient le mérite d'avoir trouvé l'explication décisive en simulant l'expérience à l'aide de ballons remplis d'eau. Il trouve que l'angle caractéristique est voisin de 42° pour l'arc primaire ; les couleurs différentes correspondent à des angles de réfraction différents, comme c'est le



Un prisme de verre disperse la lumière blanche car la déviation est fonction de la longueur d'onde de la lumière.



Expérience historique de Newton. Le second prisme ne décompose pas la lumière monochromatique issue du premier prisme. (Dessin autographe de Newton)

cas pour les glaces biseautées et les prismes de verre. Cependant on n'apprend rien sur la nature des couleurs : les explications sont teintées de réflexions théologiques et morales qui ne conduisent pas sur la bonne voie. Jusque-là les travaux de recherche sont confidentiels et ne concernent qu'un très petit nombre de lettrés. Vers la fin du XV^{ème} siècle tout va changer. La peinture va sortir des églises pour aller chez les marchands et les banquiers. On assiste à une vulgarisation des œuvres peintes ; on découvre la perspective, les anamorphoses... La couleur devient un objet profane reposant à la fois sur l'Art et la Science. Léonard de Vinci expérimente la "chambre noire", modèle simulant le fonctionnement de l'œil. Des publications destinées au public connaissent un succès considérable comme par exemple la "Magia Naturalis" de Battista Della Porta en 1558. Le terrain est prêt pour accueillir les grandes découvertes.

► Une expérience décisive : la décomposition de la lumière blanche par Newton

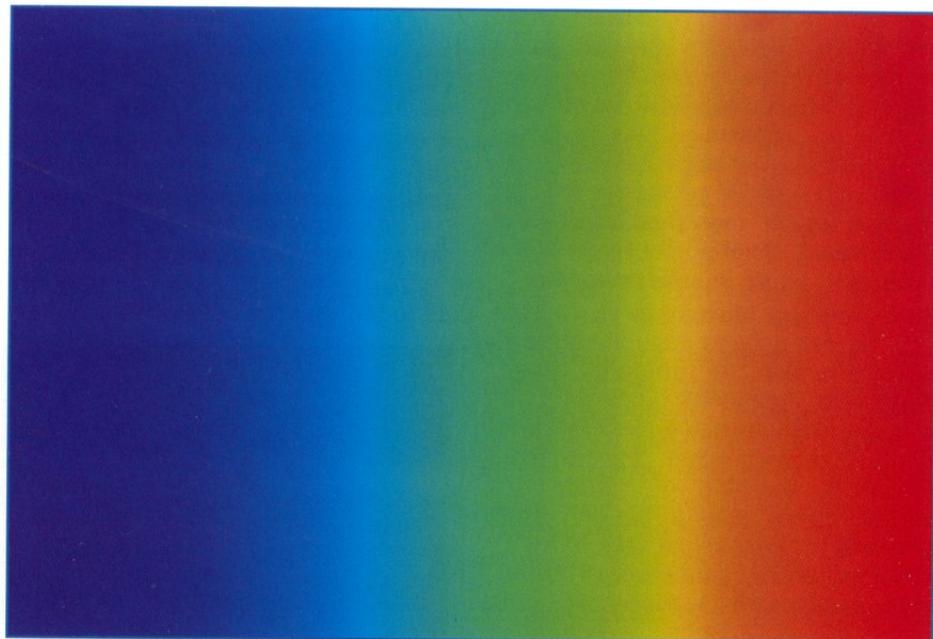
On savait depuis longtemps que certains milieux transparents pouvaient faire naître des couleurs toujours disposées selon l'ordre observé dans l'arc-en-ciel. Ainsi en recevant la lumière solaire sur un prisme de verre ou de cristal de grand angle (de l'ordre de 60 °), le phénomène coloré est particulièrement net. Newton fait à son tour l'expérience :

"En l'an 1666... je me suis procuré un prisme triangulaire pour faire des expériences sur les fameux phénomènes des couleurs. Après avoir fait l'obscurité dans la chambre et percé un trou dans le volet pour laisser pénétrer une quantité convenable de lumière solaire, j'ai placé mon prisme soit réfractée sur le mur opposé. Ce fut d'abord un divertissement très plaisant de contempler les couleurs vives et intenses ainsi produites"⁽⁶⁾... Comme ses devanciers Newton remarque bien que les différentes couleurs du rouge au violet corres-

réfractante du prisme comme le soutient Descartes ? Telles sont les deux hypothèses les plus plausibles qui s'affrontent. Newton imagine des expériences susceptibles de trancher.

Si l'hypothèse de Descartes est exacte, on peut penser que l'orientation de la surface du prisme doit influencer sur le résultat. Ainsi Newton dispose deux prismes à la suite l'un de l'autre : ces deux prismes sont identiques, l'angle d'incidence du faisceau est le même mais les prismes sont disposés perpendiculairement l'un à l'autre.

L'expérience montre que la largeur de l'image est inchangée, dans les deux cas la déviation est plus grande pour le violet que pour le rouge. La théorie de Descartes est mise à mal, mais pas complètement réfutée. De plus, les adversaires de Newton risquent de ne pas être convaincus ! Newton réalise un dispositif (un petit diaphragme) qui permet d'isoler successivement les différentes couleurs issues du premier prisme ; il analyse ensuite les faisceaux colorés à l'aide d'un second prisme. Si la lumière est produite par la surface réfractante on s'attend à voir un deuxième spectre à l'issue du second prisme. Il n'en est rien. Quelle que soit la couleur du faisceau isolé, l'image définitive reste de la même couleur ; il n'y a plus dispersion. Newton a isolé ce que nous appelons une radiation monochromatique. Cette expérience détruit la théorie de Descartes mais elle ne prouve pas

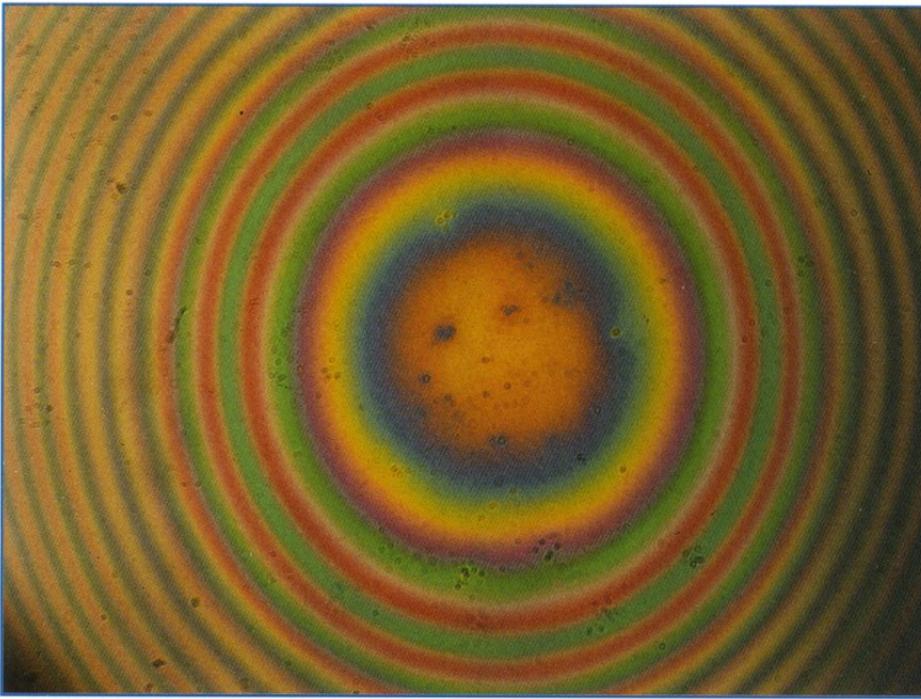


Spectre de lumière blanche.

pondent à des angles de réfraction différents. Ainsi l'indice de réfraction du milieu défini à partir de la loi de Snell-Descartes, dépend de la couleur. Mais d'où viennent les couleurs ? Font-elles partie de la lumière incidente, comme le pensent certains, ou sont-elles produites par la surface

pour autant que l'autre hypothèse est la bonne.

Pour prouver que la couleur est contenue dans la lumière incidente, Newton cherche à reconstituer la lumière blanche initiale à partir des lumières colorées dispersées. C'est effectivement ce qu'il observe.



Anneaux de Newton. Un système d'interférences qui ne pourra être expliqué que par une théorie ondulatoire à laquelle Newton ne croyait pas...

Il a réalisé la synthèse de la lumière blanche à partir de ses composantes. Le chercheur est sur la bonne voie ! Il suffit de multiplier maintenant les expériences qui apparaissent comme des conséquences de l'hypothèse retenue. Si une seule de ces expériences est en contradiction avec les hypothèses, la théorie sera détruite ; mais si, comme c'est le cas ici, toutes les expériences réalisées confirment l'hypothèse, celle-ci devient de plus en plus probable : La lumière solaire est composée de lumières colorées émises simultanément qui correspondent dans un milieu donné à des indices de réfraction propres.

Newton pense qu'il y a 7 couleurs, influencé peut-être par le symbolisme attaché à ce nombre. En réalité, nous savons qu'il y a dans le spectre continu de la lumière blanche une infinité de radiations, mais dans les conditions d'observation qu'on vient de voir, on ne distingue, en fait, nettement que 6 ou 7 couleurs.

Newton va réaliser d'autres expériences qui confirment sa théorie : Ainsi à l'aide d'un disque convenablement colorié, il réalise une synthèse de lumière blanche en jouant sur la persistance des impressions lumineuses sur la rétine.

Une autre étude, magistralement construite sur le plan expérimental, mais qui conduira dans une impasse théorique, concerne les lames minces. Les couleurs des bulles de savon et des lames minces, qu'on observe facilement dans diverses circonstances, ont de quoi fasciner. Newton imagine un dispositif qui lui permet de faire des mesures : une len-

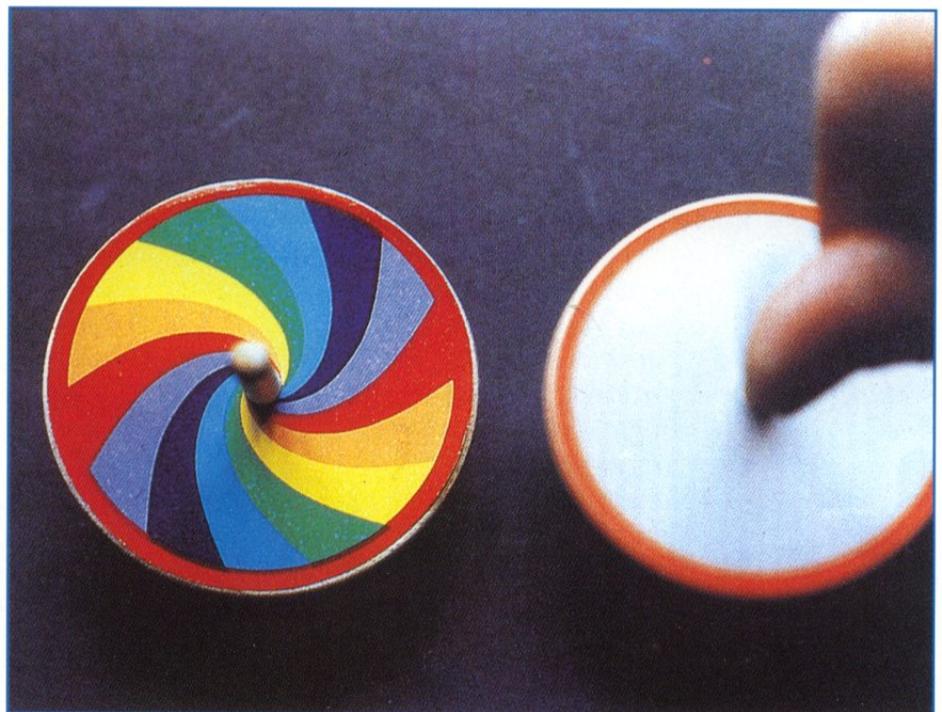
tille sphérique de grand diamètre en contact avec un plan de verre ménage un espace d'épaisseur variable à symétrie de révolution. Effectivement Newton obtient près de l'axe une série d'anneaux aux vives couleurs. Ces couleurs sont de plus en plus lavées de blanc lorsqu'on s'éloigne du centre : on obtient alors du blanc "d'ordre supérieur". Les anneaux disparaissent lorsque l'épaisseur de la lame d'air est très supérieure au micromètre. La succession de couleurs est immuable, Newton en dresse une liste qu'on désigne sous le nom d'échelle des teintes de Newton. Les

résultats expérimentaux sont d'un intérêt exceptionnel mais il ne voit pas (ou refuse de voir) qu'une théorie ondulatoire de la lumière permet d'expliquer tous ces résultats. Newton s'enferme dans sa théorie corpusculaire ; il s'obstine, il dissimule même des résultats...

Ce sera la théorie ondulatoire émise par Huygens et magistralement reprise par Fresnel qui permettra d'interpréter les phénomènes d'interférences et de diffraction.

Mais cela est une autre histoire...

- (1) Hérodote, *l'Enquête I*, 98
- (2) *Les Ecoles Présocratiques*, Gallimard, collection folio essais p 180.
- (3) *De Natura Rerum*, livre 2
- (4) *l'Enquête III*, 58
- (5) *Illiadé II*, 637
- (6) Cité par B.Maitte, *la lumière*, édition du seuil p 117



Disque de Newton. Synthèse de la lumière blanche obtenue par rotation d'un disque composé avec les couleurs du spectre.

+ Palais de la découverte

L'actualité

avril / mai / juin 2001

┌ POMPÉI,
NATURE, SCIENCES ET TECHNIQUES ┐

Palais de la découverte

POMPÉI

nature, sciences et techniques

3 avril - 22 juillet 2001

Palais de la découverte
Avenue Franklin D. Roosevelt 75008 Paris
01 56 43 20 21 - www.palais-decouverte.fr
3615 DECOUVERTE

Exposition produite par le Superintendenza archeologica di Pompei, la Soprintendenza archeologica di Napoli et Caserta, l'Istituto et il Museo di storia de la scienza de Firenze. Elle est mise en français par l'Association Chiva et s'inscrit dans le cadre du programme Méditerranéen de l'UNESCO.

L'EXPRESS Histoire

Couleurs interférentielles

par Roland Jouanisson

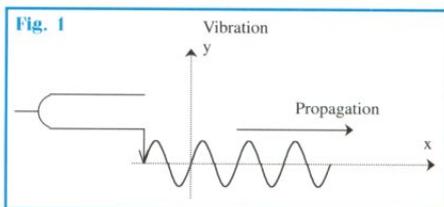
Nous examinons dans cet article divers phénomènes physiques pour lesquels l'apparition des couleurs est liée à l'aspect ondulatoire de la lumière. Parmi ceux-ci les lames minces, qui nous offrent de magnifiques nuances. Moins connues, car elles ne se présentent qu'exceptionnellement de manière naturelle, sont les couleurs dues à la biréfringence de certains cristaux naturels et de divers matériaux qui font partie de notre univers quotidien.

L'explication des couleurs interférentielles est bien connue depuis les travaux de FRESNEL notamment. Elle exige cependant un minimum de développements théoriques si l'on souhaite en approfondir certains aspects.

La plupart des expériences décrites peuvent être reproduites avec un matériel courant qu'il est facile de se procurer. C'est pourquoi nous donnons quelques détails expérimentaux pour faciliter la tâche du lecteur intéressé.

► Comment faire interférer deux faisceaux lumineux

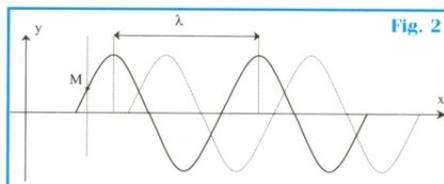
L'analogie avec les ondes mécaniques permet d'imaginer une théorie ondulatoire de la lumière. Examinons le cas d'une vibration sinusoïdale produite par l'extrémité d'une branche de diapason à laquelle on a fixé une pointe perpendiculaire à la surface de l'eau et qui vibre à la fréquence f .



La direction de la vibration est perpendiculaire à la direction de la propagation (on a ici une onde transversale). La déformation produite se propage à la vitesse V .

Au bout du temps $T = \frac{1}{f}$, l'onde a parcouru la distance $\lambda = VT = \frac{V}{f}$ qui est, par définition, la **longueur d'onde** du phénomène vibratoire.

Si on néglige l'amortissement, l'onde se retrouve dans une position identique aux temps $T, 2T, 3T, \dots$ c'est à dire lorsqu'elle a parcouru des distances égales à $\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$



On remarquera que chaque point M du milieu vibre comme la source (à l'amortissement près), dans une direction verticale, mais avec un certain retard.

Que se passe-t-il maintenant si le même point M est sollicité simultanément par deux vibrations (que nous supposons ici parallèles) qui se propagent dans le milieu et qui proviennent de deux sources S_1 et S_2 de même fréquence f ?

L'expérience montre que pour les petites déformations le mouvement résultant s'obtient en faisant la somme géométrique des mouvements incidents. Dans notre cas particulier, cette somme se réduit à une somme algébrique. On voit ainsi que si le point M est soumis à deux vibrations égales et de sens contraire, il reste au repos.

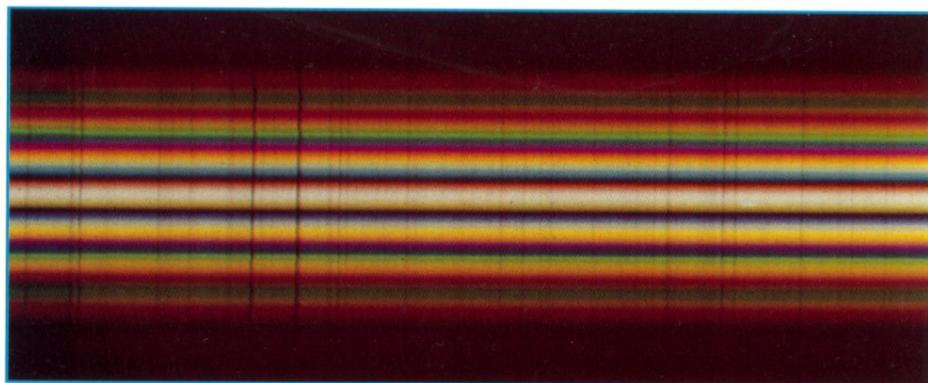
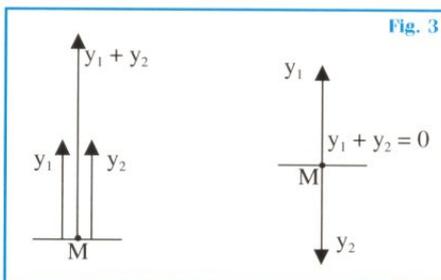
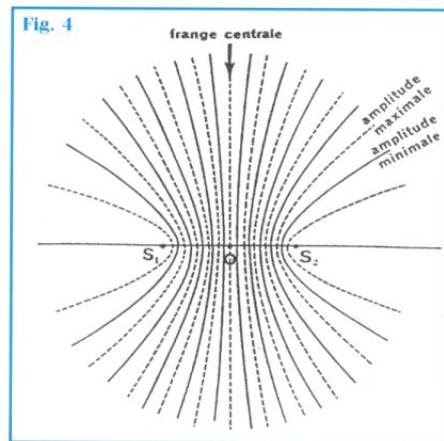


Fig. 3. Franges d'interférences en lumière blanche obtenues à partir des fentes d'YOUNG.



Le champ d'observation comprend des lignes de repos, alternant avec des lignes d'amplitude maximale. Ces lignes (ou franges) sont des hyperboles équilatères.



REMARQUES

Si l'on veut transposer le problème de la mécanique à l'optique, on est confronté à d'importantes difficultés expérimentales. En effet, les ordres de grandeurs sont très différents.

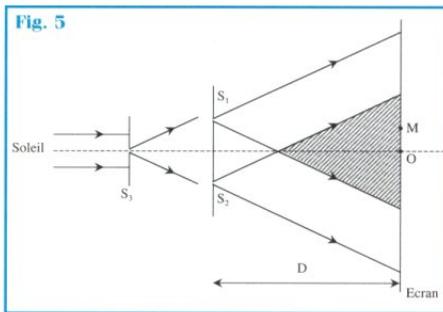
- Les fréquences utilisées sont de l'ordre de 10^2 Hz en mécanique et de 10^{15} Hz en optique. Les longueurs d'onde sont respectivement de l'ordre du cm et du micromètre (10^{-6} m).
- La phase d'une vibration lumineuse change un très grand nombre de fois pendant la durée nécessaire à l'observa-

tion, de sorte qu'il est impossible d'observer des interférences pro-

► D'une manière générale, les points de repos (ou d'amplitude minimale) sont tels que les vibrations sont en opposition de phase et les points d'amplitude maximale sont tels que les vibrations sont en phase. Dans le premier cas, la différence de marche vaut $\lambda/2$ ou $3\lambda/2$, etc. Dans le second cas, elle vaut $\lambda, 2\lambda$, etc. Pour des valeurs différentes l'amplitude est intermédiaire.

duites par deux sources indépendantes, même si elles ont rigoureusement même fréquence.

- L'utilisation de la lumière blanche complique les phénomènes comme on le verra par la suite.



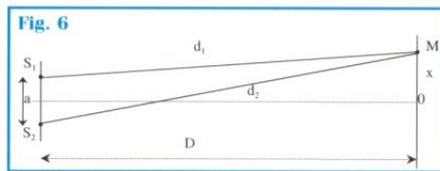
Divers dispositifs permettent cependant de lever ces difficultés. L'expérience historique de Thomas Young (1807) utilise la lumière diffractée par deux petites ouvertures S_1 et S_2 , elles-mêmes éclairées par une ouverture S_3 exposée au soleil. Les faisceaux issus de S_1 et S_2 ont une partie commune à l'intérieur de laquelle on observe des franges d'interférence.

Ces franges ne sont pas localisées : il est possible de les observer dans n'importe quel plan situé à la distance D des sources : on observe seulement une augmentation de l'interfrange quand D augmente (voir figure 5).

La coloration des franges provient du fait que l'interfrange dépend de la longueur d'onde, c'est à dire de la couleur des différentes radiations dont est constituée la lumière blanche.

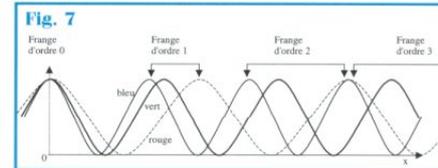
En reprenant le raisonnement utilisé pour les ondes mécaniques, on détermine l'état vibratoire en un point M de l'espace où peuvent parvenir les ondes issues de S_1 et S_2 (voir ci-dessous).

Cet état vibratoire dépend de la différence de marche $\delta = d_2 - d_1$ des chemins S_2M et S_1M parcourus par la lumière.



Si $\delta = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, k\lambda$ (k entier)

se sur l'axe Ox , en y faisant figurer les longueurs d'onde extrêmes (bleu et rouge) et la longueur d'onde moyenne (vert).

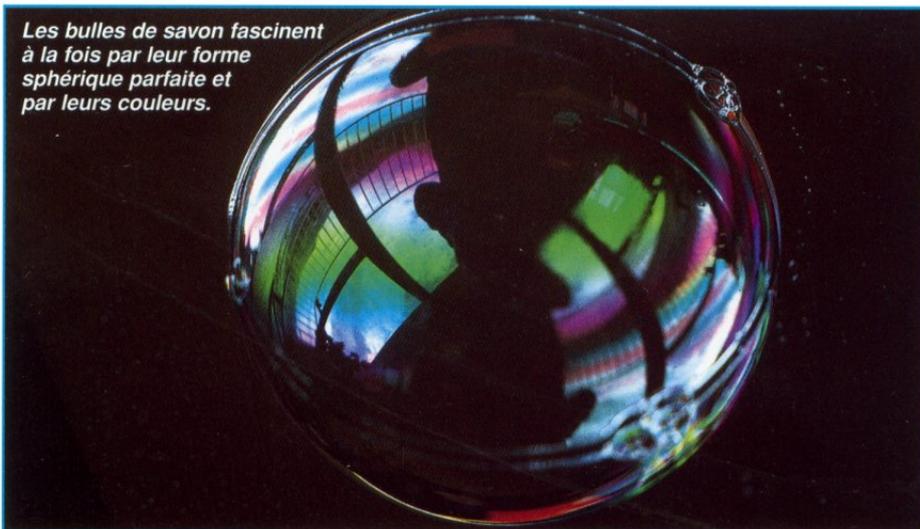


L'œil voit le résultat de la superposition des différentes couleurs ; ainsi la première frange brillante (qui correspond à $k=0$) est pratiquement blanche au centre car en ce point toutes les couleurs y présentent un maximum de lumière (en effet $x=0$ pour $k=0$, que soit λ).

Ensuite se produisent des décalages dus au fait que l'interfrange augmente avec λ . On observe le premier minimum nul pour le bleu. En ce point la frange est rouge ; lorsque le premier minimum est atteint pour le rouge, le bleu domine, etc.

En réalité cet aspect coloré est également influencé par le fait que le système visuel est beaucoup plus sensible aux radiations moyennes du spectre (jaune, vert) qu'aux radiations extrêmes, ce qui explique, qu'en fait on observe plus de franges colorées que le simple schéma ci-dessus n'en laisse prévoir.

Les teintes observées sont les mêmes que les couleurs des lames minces, ou des teintes de l'échelle de NEWTON (du centre blanc), que nous allons étudier à l'aide d'un dispositif plus commode à réaliser.



Les bulles de savon fascinent à la fois par leur forme sphérique parfaite et par leurs couleurs.

Couleur des franges d'interférences

Si les sources S_1 et S_2 de l'expérience précédente sont éclairées en lumière blanche (ce qui était le cas dans l'expérience des trous d'YOUNG), on observe des franges, mais en nombre limité (3 ou 4 de part et d'autre d'une frange centrale à peu près blanche) [voir photo n°1]. Les franges sont colorées, bordées de bleu vers l'intérieur et de rouge vers l'extérieur ; de plus, leur aspect change quand on s'éloigne du centre : les couleurs s'estompent, on ne distingue plus que des bandes pâles, alternativement roses et vertes qui finissent par disparaître pour donner une lumière blanche⁽¹⁾.

Les vibrations arrivent en phase au point considéré et leurs amplitudes s'ajoutent, ce qui se traduit ici par un maximum de lumière.

Si $\delta = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots, (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ (k entier)

Les vibrations arrivent en opposition de phase et leurs amplitudes se retranchent. En particulier si ces amplitudes sont égales, l'amplitude résultante est nulle ce qui se traduit par une frange obscure.

A partir des données de la figure 6 on peut calculer la position des franges brillantes, soit :

$x \cong k \frac{\lambda D}{a}$
 a : distance des sources S_1S_2 .
 D : distance des sources au plan d'observation

ainsi que l'interfrange $i = \frac{\lambda D}{a}$

A partir de ces données on représente la répartition de l'énergie lumineuse

Interférences par les lames minces

Les circonstances permettant d'obtenir des interférences à partir de deux sources, comme dans l'exemple des trous d'YOUNG, ont peu de chance de se présenter naturellement, pour différentes raisons exposées précédemment. En revanche, divers phénomènes naturels peuvent conduire à l'observation d'interférences : c'est le cas des lames minces comme les bulles de savon.

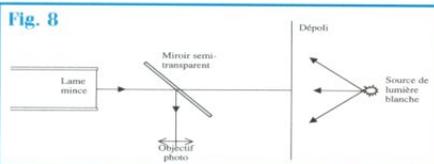
A l'attention de ceux qui envisageraient d'observer et de photographier les multiples particularités de ce phénomène, j'indique quelques détails d'ordre expérimental.

De nombreux liquides à base de savon ou de produits détergents peuvent convenir (l'eau pure a une tension superficielle trop élevée pour qu'il soit possible d'obtenir des films stables). Un des nombreux produits

utilisés pour la vaisselle convient. Il est préférable d'ajouter de la glycérine qui limite l'évaporation (par exemple essayer des mélanges du type eau + teepol + glycérine). Divers auteurs ont signalé des solutions permettant d'obtenir des bulles de grandes dimensions (solution de triéthanolamine et d'acide oléique). Sachez cependant que selon le type de liquide utilisé vous obtiendrez des lames présentant des caractéristiques différentes. De même les couleurs obtenues varient un peu selon la nature de la source de lumière (voir remarque 1).

On réalise les différents supports adaptés aux expériences qu'on désire entreprendre à partir de fils métalliques. Les photographies reproduites ci-contre ont été obtenues à partir de lames formées à l'extrémité d'un morceau de tube de cuivre de 4 cm de diamètre qu'on peut aisément fixer dans une position quelconque.

Pour photographier les lames il est parfois nécessaire de réaliser un montage comportant un miroir semi-transparent (voir schéma ci-dessous) qu'on peut se procurer chez un vitrier. La source étendue de lumière est un dépoli (papier calque) éclairé vivement par une lampe à halogène, par exemple celle d'un rétroprojecteur. Il est préférable d'utiliser la lumière du ciel si le local où l'on opère le permet. La lame semi transparente placée à 45° de la normale à la lame de liquide laisse passer la lumière qui permet de l'éclairer ; la lumière réfléchie par la lame est dirigée vers l'objectif photographique. Avec ce dispositif il est possible d'obtenir une bonne mise au point sur l'ensemble d'une lame plane. Naturellement il est plus simple d'observer les lames par transmission mais les couleurs obtenues sont dans ce cas beaucoup plus pâles, car elles proviennent d'interférences entre ondes d'amplitudes très différentes.



Pour obtenir des bulles stables il suffit de les poser sur une plaque de verre mouillée. On peut aussi les souffler directement sur la plaque à partir d'une goutte de liquide et d'une paille. En opérant de la sorte on n'obtiendra que des demi bulles (pour s'en rendre compte il suffit de poser une bulle sur un miroir plan : l'objet et son image forment une bulle sphérique).

De très nombreuses et très belles expériences sont possibles avec les lames minces et les bulles : elles per-

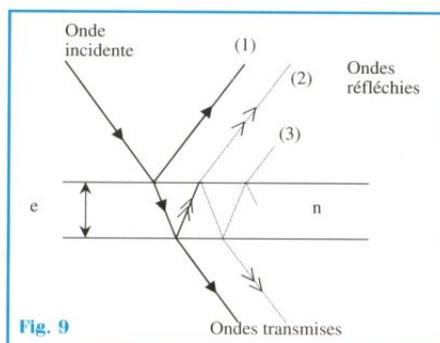


Le laser permet d'obtenir des franges d'interférences avec une lame épaisse (ici un morceau de verre ordinaire).

mettent, entre autres, d'étudier les surfaces minimales. Nous limitons ici l'étude à l'observation et à l'interprétation des couleurs qui apparaissent par réflexion, lorsque la lame est placée dans un plan vertical, de sorte qu'il se forme par gravité un coin de liquide d'épaisseur variable, donnant naissance à des plages colorées horizontales. Avec ce dispositif on obtient facilement des lames stables dont l'épaisseur est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière ($0,5 \times 10^{-3}$ mm). Cette épaisseur peut être 10 fois inférieure sans qu'il y ait rupture de la lame.

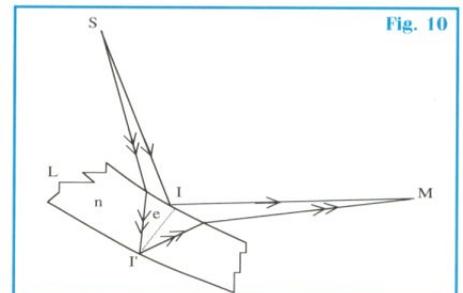
Les couleurs observées résultent d'un phénomène analogue à celui étudié avec les interférences à deux sources, mais dans le cas présent les deux ondes sont, d'une part, l'onde réfléchie par la face antérieure de la lame et, d'autre part, l'onde réfléchie par la face postérieure (voir ci-dessous).

Le calcul montre que ces deux ondes ont des amplitudes a_1 et a_2 comparables. En incidence normale on trouve $a_2 = 0,98a_1$, de sorte que les minimums de lumière sont pratiquement nuls. En réalité on peut se demander s'il y a lieu de tenir compte des ondes réfléchies successives telles que a_3, a_4, \dots . Par exemple, on trouve $a_3 = 0,02a_2$. Or si a_1 et a_2 sont en opposition de phase a_2 et a_3 sont en phase à cause des différences de nature des réflexions (voir ci-dessous), de sorte que a_2 et a_3 s'ajoutent. On voit que cette somme est égale à a_1 : la lame est parfaitement noire dans les conditions décrites plus haut.



Il n'en est pas de même pour les ondes transmises, car les interférences ont lieu entre des ondes d'amplitudes très différentes. Ainsi l'onde transmise secondaire a une amplitude 50 fois plus faible que celle de l'onde transmise principale : les franges sont peu visibles.

Il nous reste à expliquer pourquoi ces phénomènes d'interférence sont possibles et pourquoi les couleurs observées sont localisées sur la lame elle-même et pas ailleurs, ce qui n'est pas aussi simple qu'on pourrait l'imaginer !



Le schéma ci-dessus montre que pour aller d'un point source S à un point M la lumière peut suivre deux chemins différents : l'un de ces trajets, SIM, concerne une onde réfléchie sur la face supérieure de la lame et le trajet SI'M concerne une onde réfléchie sur la face inférieure. La différence de marche entre ces deux trajets dépend des angles d'incidence en I et I', de l'épaisseur e de la lame et de l'indice de réfraction n du liquide. Pour simplifier, plaçons-nous dans le cas où les angles d'incidence sont voisins de zéro (ce qui correspond à l'observation dans une direction perpendiculaire à la lame). Dans ce cas la différence de marche géométrique est $2e$ et la différence de marche optique² $\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2}$.

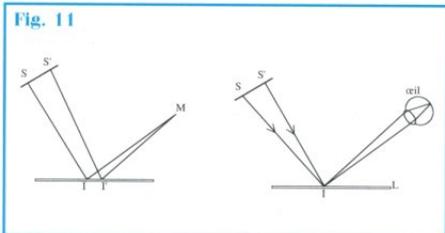
En effet les deux réflexions sont de nature différente : l'une correspond à une réflexion sur un milieu plus réfringent et l'autre à une réflexion sur un milieu moins réfringent. L'expérience montre que dans le pre-

mier cas il se produit un changement de phase égal à π pour l'onde réfléchie, ce qui correspond à une différence de marche supplémentaire égale à $\lambda/2$.

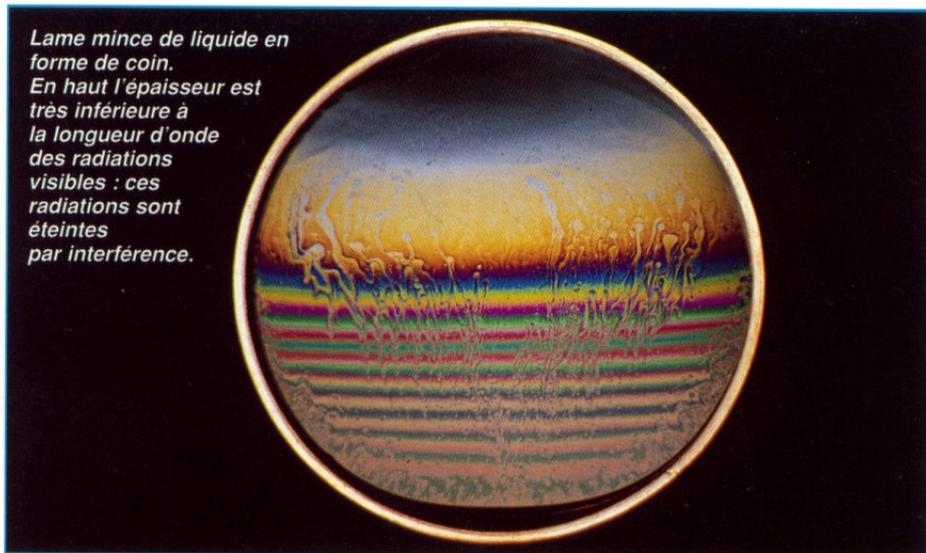
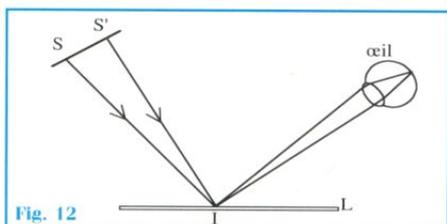
La différence de marche en M est parfaitement définie avec une source ponctuelle S ; en M on doit pouvoir observer des interférences. C'est effectivement le cas si la source S est obtenue en focalisant par exemple un faisceau laser qui donne naissance à deux ondes cohérentes réfléchies.

Mais si on éclaire la lame avec une source étendue il n'y a pas d'interférences possibles au point M.

En effet, à la source S correspond un couple de rayons SIM réfléchis en un point où l'épaisseur est e tandis qu'à la source S' correspond un couple de rayons S'IM réfléchis en un point où l'épaisseur est e' \neq e. Statistiquement les états vibratoires créés par les sources telles que S' et S se détruisent (on peut dire aussi que si à S correspond par exemple un maximum de lumière, on peut toujours trouver un point S' voisin tel que l'état vibratoire en M soit un minimum de lumière (voir ci-dessous).



Ce résultat nous suggère que si les rayons précédents rencontraient la lame en un même point I il serait possible d'observer des interférences. C'est effectivement le cas si l'œil de l'observateur met au point sur la lame en accommodant. Tous les couples de rayons qui pénètrent dans l'œil de l'observateur ont traversé la lame en un point où l'épaisseur a une valeur e bien définie, quel que soit le point source. La différence de marche introduite par la lame est donc la même pour tous dans la mesure où elle ne dépend que de e. En fait, cette différence de marche dépend aussi de l'angle d'incidence des rayons lumineux sur la lame, mais dans les conditions usuelles d'observation cette variation est négligeable. En effet, la pupille de l'œil est très petite, de sorte que l'angle formé par les rayons limites qui pénètrent dans l'œil est très faible voir (ci-dessous).



Les franges semblent dessinées sur la lame sur laquelle l'œil accomode spontanément. En lumière monochromatique ces franges sont alternativement claires et sombres. Le long de ces lignes, la différence de marche, qui ne dépend que de l'épaisseur de la lame, reste constante : il en résulte que les franges dessinent les **lignes d'égale épaisseur**.

En incidence quasi normale on détermine :

- les franges noires par
$$\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2} = k\lambda + \frac{\lambda}{2} \quad (k \text{ entier})$$

soit $e = k \frac{\lambda}{2n}$

- les franges brillantes par
$$\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

soit $e = (2k - 1) \frac{\lambda}{4n} \quad (k \text{ entier}).$

Couleurs des lames minces

Lorsque l'on éclaire des lames minces avec de la lumière blanche on voit apparaître de magnifiques couleurs. Pour interpréter correctement ces couleurs il faudrait se référer à un code, comme par exemple celui établi par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) qui permet de repérer chaque couleur par un point dans un diagramme colorimétrique. Par exemple il est possible de suivre, à l'aide de ce diagramme, l'évolution en fonction de l'épaisseur de la couleur d'une lame maintenue verticalement. Dans cet article nous nous limitons à la justification des couleurs observées sur des lames éclairées par une lampe halogène.

Lorsque la lame a une épaisseur très inférieure à la longueur d'onde de la lumière, la différence de marche entre les deux ondes qui interfèrent est pra-

tiquement égale à $\lambda/2$; toutes les radiations sont éteintes et on observe une plage uniformément noire (voir le haut de la photographie). Mais au fur et à mesure que l'épaisseur augmente, l'extinction est moins complète, la teinte devient grise. Puis on s'approche de la condition qui donne $\delta = \lambda$ obtenue pour $2ne = \lambda/2$ soit $e = \lambda/4n$. A ce moment on a une frange brillante dans le bleu mais cette couleur est peu visible surtout avec une lampe ordinaire. Au fur et à mesure que l'épaisseur augmente les franges brillantes vont affecter l'ensemble des couleurs visibles du spectre : on observera alors une large plage blanchâtre qui va virer au jaune lorsque l'extinction du bleu va se produire pour

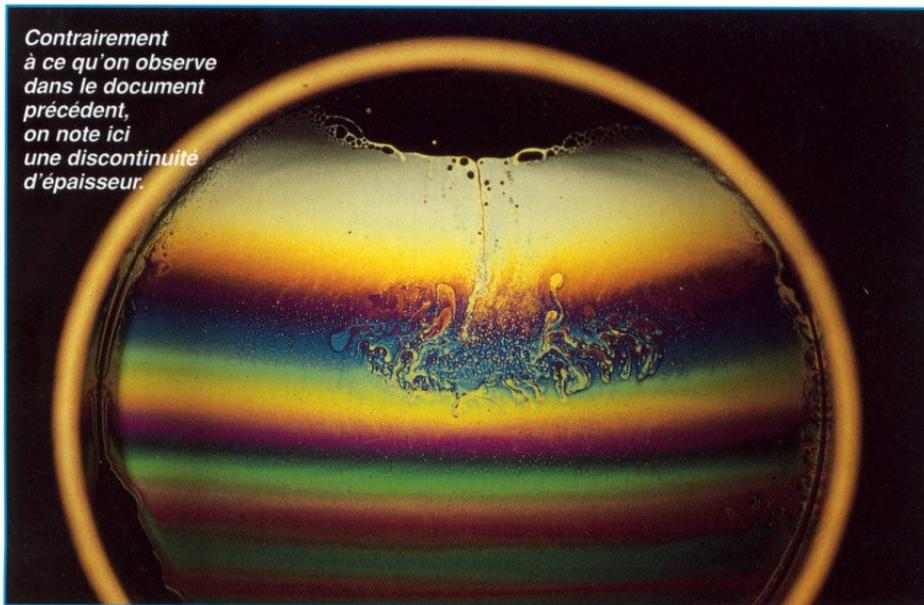
$$\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2} = \frac{3\lambda}{2}$$

soit $e = \frac{\lambda}{2n} \quad (\text{environ } 150 \text{ nm})$

Lorsque la condition d'extinction atteint le vert-jaune ($\lambda = 565 \text{ nm}$) il se produit un changement brutal dans la répartition des couleurs qui, du rouge, passent au bleu par l'intermédiaire du pourpre (dite teinte sensible). On obtient ensuite des bleus, puis des verts, etc. La justification des couleurs devient de plus en plus complexe, car il y a plusieurs extinctions simultanées dans le spectre : on pourra se reporter à l'échelle des teintes de NEWTON à centre noir pour les comparer aux couleurs observées.

On appelle teintes du premier ordre toutes celles obtenues jusqu'à la première teinte sensible puis teintes du deuxième ordre celles comprises entre la première et la seconde, etc. Les différences de marche sont alors comprises entre 0 et 565 nm dans le premier cas et entre 565 et 1128 nm dans le second. La photographie suivante montre un exemple de couleurs du deuxième ordre où l'on peut suivre l'évolution des couleurs du bleu foncé au pourpre en passant par le vert et le jaune.

Contrairement à ce qu'on observe dans le document précédent, on note ici une discontinuité d'épaisseur.



REMARQUES

1. Les couleurs obtenues peuvent différer, selon que la source de lumière blanche est le soleil ou une lampe à incandescence. En effet, la composition spectrale du soleil est celle d'un corps noir à 5 500 K alors que celle d'une lampe est de 3 000 K environ. La lumière émise par une lampe contient proportionnellement plus de rouge alors que le maximum d'énergie émise par le soleil se trouve dans le vert-jaune.

2. La reproduction des couleurs ne peut être assurée que d'une manière imparfaite, de par son principe même. En effet les différentes techniques font appel à un système trichrome qui ne permet pas de reproduire parfaitement les teintes pures, comme le violet par exemple. Il ne faut pas oublier non plus que les couleurs reproduites dans cette revue sont déjà la reproduction de diapositives.

3. La composition du liquide utilisé pour obtenir des lames minces peut

jouer sur la structure de ces lames. Par exemple, il arrive qu'à la zone noire du haut de la lame succède sans transition une zone claire, ce qui implique une discontinuité d'épaisseur. On explique ce phénomène par l'existence de deux couches monomoléculaires de savon, d'épaisseur constante, entre lesquelles l'eau a été expulsée, et qui succède à une simple couche très fine d'eau.

4. L'observation des lames minces réserve beaucoup de surprises. En général, dès que la lame est en place, à l'abri de perturbations extérieures, on voit apparaître un état stable avec des bandes colorées horizontales.

Parfois on assiste à la formation de deux zones bien distinctes avec un régime stable en bas et une région au dessus où se produisent des mouvements incessants d'apparence chaotique très sensibles aux influences extérieures, mais qui peuvent se produire spontanément.

D'une manière générale les lames

minces, surtout dans la partie supérieure, peuvent être influencées par des variations de température, des variations de pression (par exemple une onde sonore), des variations de tension superficielle (obtenues par exemple en approchant un morceau de coton imbibé d'ammoniaque).

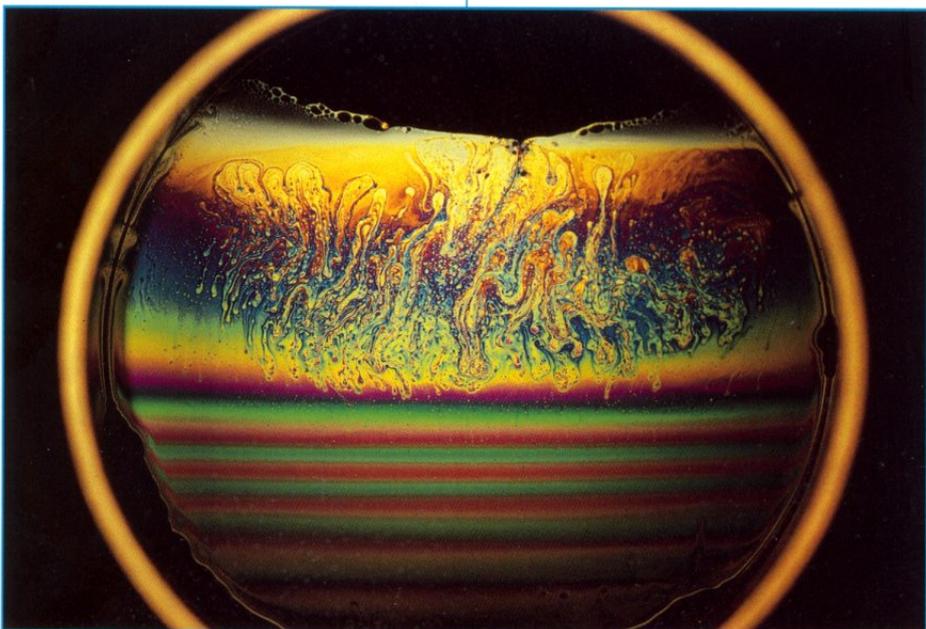
5. Ce sont les interférences lumineuses qui permettent d'expliquer divers phénomènes colorés observés dans la nature. Outre les couleurs des bulles de savon, tout le monde a remarqué les couleurs irisées des traces de gasoil répandu sur une chaussée mouillée ou sur une nappe d'eau. Quand on nettoie une vitre avec de l'alcool on remarque l'apparition de couleurs avant l'évaporation du liquide. Il est possible également d'observer des franges colorées quand on presse l'une contre l'autre deux plaques de verre. C'est ainsi que NEWTON a étudié les franges des lames minces d'air entre une surface plane et une surface sphérique (anneaux de NEWTON). On rencontre dans la nature des mouches munies d'ailes suffisamment minces pour produire des couleurs roses ou vertes par interférence.

D'autre part, certaines structures lamellaires multicouches produisent des couleurs par interférence. Ces structures sont responsables de la couleur de certains papillons, des plumes du cou des canards, des ocelles du paon, du martin pêcheur... En faisant interférer des ondes réfléchies sur des lames on peut sélectionner une couleur. En effet, en incidence normale et pour une épaisseur e d'une lame d'air bien constante, seules les longueurs d'onde obéissant à la condition $2e = k\lambda$ sont transmises. Pour une faible épaisseur, ces radiations monochromatiques sont peu nombreuses. On réalise sur ce principe des filtres interférentiels, transmettant une couleur bien déterminée.

► Interférences des lames biréfringentes en lumière polarisée

Il existe une autre possibilité importante d'obtenir des interférences avec certaines lames cristallines, mais les magnifiques couleurs susceptibles d'être produites ne sont observables qu'en lumière polarisée et, de plus, avec l'aide d'un "analyseur".

Certains phénomènes naturels sont à l'origine de la polarisation de la



Une zone chaotique peut coexister avec une zone parfaitement calme voisine.

lumière. Par exemple la diffusion par les molécules de l'atmosphère s'accompagne de polarisation (elle permet d'expliquer également le bleu du ciel) ; la réflexion et la réfraction s'accompagnent de polarisation. Ces phénomènes n'ont été découverts que tardivement car notre système visuel n'est pas (ou pratiquement pas) capable de déceler une lumière polarisée.

La lumière **polarisée** a des propriétés différentes de la lumière du soleil ou des différentes sources incandes-

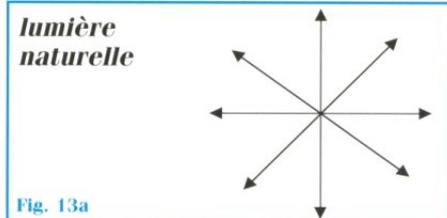


Fig. 13a

centes ou lumineuses, qui fournissent une lumière dite **naturelle**. Une lumière polarisée rectilignement est

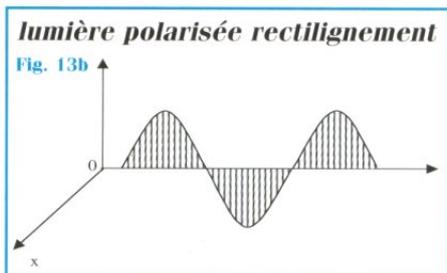


Fig. 13b

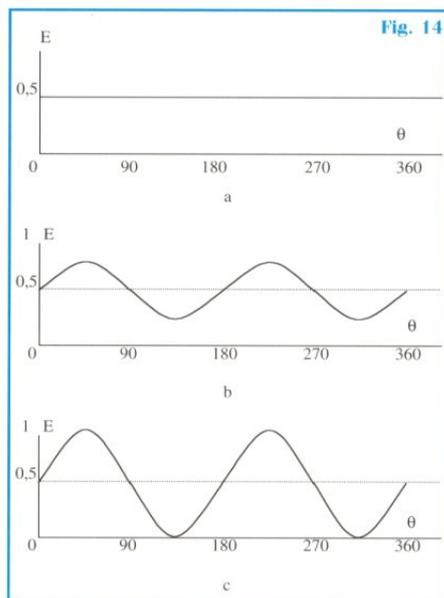
une onde transversale qui se propage dans un plan bien défini alors qu'une lumière naturelle n'a pas de plan de vibration privilégié (voir schémas ci-dessous). Pour polariser la lumière il suffit de filtrer une lumière naturelle à l'aide d'un "polariseur". Un des moyens les plus commodes actuellement est d'utiliser une feuille polarisante dite "Polaroid". Théoriquement on peut obtenir 50 % de lumière polarisée à partir de lumière naturelle (c'est à peu près le cas avec les polariseurs utilisant la double réfraction du spath d'Islande, qui est constitué de calcite très pure). Avec un polaroid on ne dépasse pas 35 %, et de plus la polarisation n'est pas parfaite mais cet instrument commode est suffisant pour réaliser les expériences décrites.

Pour analyser l'état de polarisation d'une lumière on utilise un polariseur (qu'on appelle dans ce cas "analyseur"). On fait tourner cet analyseur dans son plan autour d'un axe confondu avec la direction de propagation de la lumière. Au cours de cette rotation on note les possibilités suivantes :

- a. Si la lumière incidente est naturelle l'intensité du faisceau transmis reste constante (a).
- b. Si la lumière incidente est partiellement polarisée l'intensité du fais-

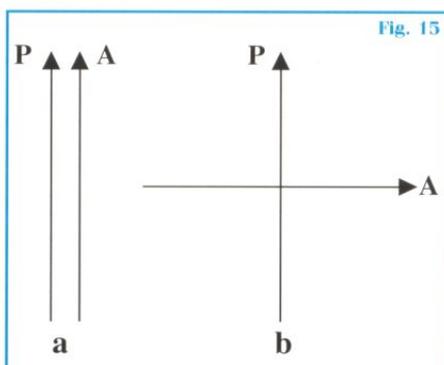
ceau transmis passe par des maximums et des minimums non nuls alternés tous les quarts de tour (b). C'est ce que l'on observe par exemple quand on examine le ciel bleu.

c. Si la lumière incidente est totalement polarisée on observe des maximums et des minimums nuls répartis comme précédemment (c).



Dans tout ce qui suit on se placera dans ce dernier cas et on examinera en particulier deux positions relatives particulières des polariseurs :

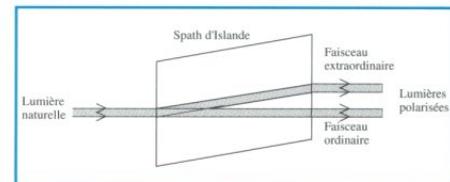
- polariseur et analyseur dits "parallèles" : un maximum de lumière est transmis (a),
- polariseur et analyseur dits "croisés" : aucune lumière n'est transmise (b).



Action d'une lame biréfringente sur une lumière polarisée

Nous avons évoqué plus haut le cas du spath d'Islande qui permet d'observer le phénomène de double réfraction : à un faisceau incident tombant normalement sur la face d'entrée du cristal

correspondent deux faisceaux émergents. L'un de ces faisceaux, qui obéit aux lois de DESCARTES, traverse le cristal sans déviation (faisceau ordinaire). Un deuxième, dévié, donne naissance à un faisceau dit "extraordinaire". Ces deux faisceaux sont polarisés et leurs directions de polarisation sont rectangulaires.



La double réfraction est observée dans la plupart des cristaux naturels. Seuls les cristaux appartenant au système cubique (comme la fluorine ou le sel gemme) se comportent comme le verre ordinaire ou les gaz et liquides, qui sont dits isotropes. Les milieux biréfringents ont des propriétés optiques qui diffèrent selon la direction envisagée (milieu anisotropes). Par exemple, dans le cas des cristaux "uniaxes" comme le spath ou le quartz on définit deux indices principaux n_e (indice extraordinaire) et n_o (indice ordinaire) qui caractérisent les propriétés de ce matériau.

Pour le spath les mesures donnent

$$n_o - n_e = 0,17$$

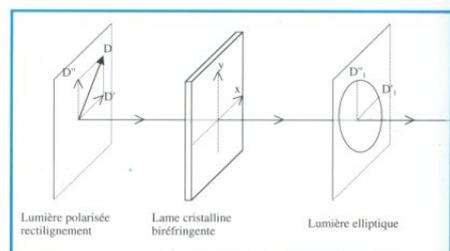
et pour le quartz

$$n_o - n_e = 0,009.$$

La biréfringence du spath est exceptionnelle ; dans la plupart des cas on trouve des valeurs inférieures à 0,01.

En dehors des cristaux naturels il existe de nombreux composés organiques transparents qui sont biréfringents, cette propriété étant liée à leur mode de production (étrirage). C'est ainsi qu'on pourra se procurer (à bon compte) des feuilles de polyéthylène (papier des fleuristes), des plaques de verre organique (polycarbonates), de simples rubans adhésifs (scotch...).

Examinons maintenant l'action d'une lame mince biréfringente sur une lumière polarisée, en supposant pour simplifier que la lame est perpendiculaire aux rayons lumineux, c'est à dire qu'elle est parallèle au plan d'onde.

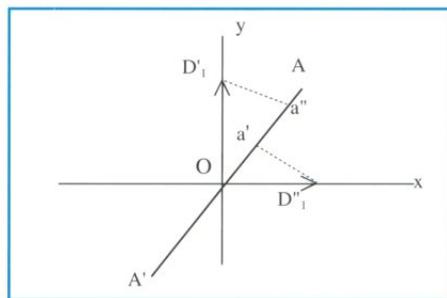


Quelle que soit la manière dont est taillée la lame il existe dans le plan d'onde deux vibrations rectilignes D' et D'' rectangulaires, et deux seulement, qui peuvent se propager

sans altération dans la lame. Ces deux vibrations se propagent à des vitesses différentes v' et v'' auxquelles correspondent des indices de réfraction $n' = \frac{C}{v'}$ et $n'' = \frac{C}{v''}$ (C étant la vitesse de la lumière dans le vide).

Il en résulte qu'à la sortie de la lame ces vibrations présentent une différence de marche optique $\delta = (n'' - n')e$

Ces vibrations sont cohérentes, elles sont susceptibles d'interférer. En réalité comme elles se trouvent dans des plans perpendiculaires, aucune interférence n'est possible. C'est pourquoi il est nécessaire de placer un analyseur à la suite de la lame. Celui-ci transmet les composantes Oa' et Oa'' des vibrations selon la direction de polarisation AA' de l'analyseur.



En définitive, pour observer des interférences à l'aide d'une lame biréfringente, il est nécessaire que trois conditions soient réalisées simultanément :

1. la lumière incidente doit être parfaitement polarisée de manière à obtenir des vibrations cohérentes ;
2. la lumière doit être analysée de manière à ce que les vibrations émergentes aient une direction commune ;
3. La lame doit être orientée de manière à ce que les directions privilégiées Ox et Oy (dites lignes neutres) fassent un angle non nul avec la direction de polarisation.

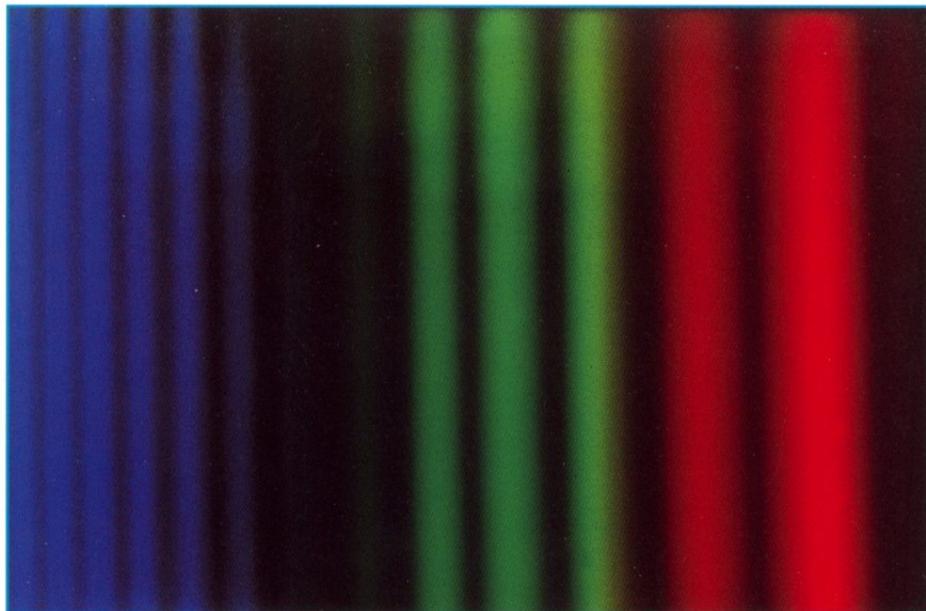
Pour une visibilité maximale on se place essentiellement dans les cas suivants :

- les lignes neutres de la lame font un angle de 45° avec la direction de la polarisation rectiligne,
- l'analyseur et le polariseur sont soit "parallèles" soit "croisés".

► Lumière elliptique

Examinons les interférences obtenues avec les montages décrits précédemment.

OP représente la vibration polarisée à l'entrée de la lame dont les lignes neutres ont pour direction $y'y$ et $x'x$. Les vibrations transmises selon



Spectre cannelé de lumière correspondant à du blanc «d'ordre supérieur».

Ox et Oy, en phase à l'entrée, ont pour amplitude $a = a_0 \cos \alpha$ et $b = a_0 \sin \alpha$. A la sortie de la lame ces vibrations sont déphasées de

$$\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} (n'' - n')e$$

de sorte que les vibrations peuvent être mises sous la forme : $x = a \cos \omega t$; $y = b \cos(\omega t - \varphi)$.

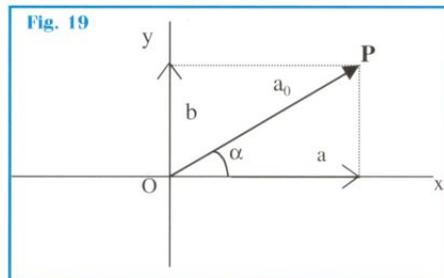


Fig. 19

On montre que la vibration résultante est une vibration elliptique inscrite dans un rectangle de côté $2a$ et $2b$. Cette vibration ne peut être éteinte par l'analyseur.

Contentons-nous d'étudier les cas particuliers suivants :

1. Si $\varphi = 2k\pi$ ou $\delta = k\lambda$ (k entier) la vibration émergente est identique à la vibration incidente ; on a une **lame onde**. Par exemple, entre polariseurs "croisés", la lumière est éteinte.
2. Si $\varphi = (2k+1)\pi$ ou $\delta = k\lambda + \lambda/2$ la lame introduit un retard égal à $\lambda/2$ ou $3\lambda/2$, ... elle est dite **demi-onde**. La vibration émergente est encore rectiligne mais elle est symétrique de la vibration incidente par rapport aux lignes neutres. Elle peut être éteinte par une rotation convenable de l'analyseur.

Cas particulier important

Dans la pratique on utilise fréquemment le montage suivant où $\alpha = 45^\circ$ avec polariseurs croisés.

- Si la lame est onde : la vibration est éteinte,

- Si la lame est demi-onde : la vibration est transmise. Les phénomènes sont inversés entre polariseurs parallèles.

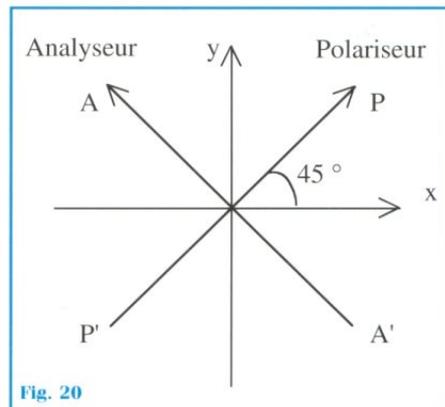


Fig. 20

► Interférences en lumière blanche

Les résultats précédents sont nécessaires pour comprendre l'apparition des couleurs quand on éclaire une lame biréfringente en lumière blanche. Cependant les explications données lors de l'étude des lames minces peuvent être reprises, ce qui va nous permettre d'abrèger la démonstration.

Lorsque λ varie le déphasage varie pour deux raisons, car les indices de réfraction n' et n'' dépendent de λ . Négligeons en première approximation cette variation qui est faible.

Dans ce qui suit, on suppose que l'on observe les teintes entre polariseurs croisés avec des lames biréfringentes dont les lignes neutres font un angle de 45° avec les directions de polarisa-